

## О МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФОРМУЛИРОВКЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

Г. И. ФУКС

Первый закон термодинамики представляет собою приложение всеобщего закона сохранения и превращения энергии к явлениям взаимопревращения тепловой и других видов энергии. Общей математической его формулировкой в технической термодинамике является выражение:

$$Q = U_2 - U_1 + AW. \quad (1)$$

При обратимом процессе данной закономерности с подводом тепла  $Q$  к рабочему телу получается работа  $W_o$  и происходит приращение внутренней энергии рабочего тела на величину  $U_{2o} - U_1$ :

$$Q = U_{2o} - U_1 + AW_o. \quad (2)$$

Для элементарного обратимого процесса:

$$dQ = dU_o + AdW_o \quad (3)$$

Если совершается необратимый процесс (безразлично, равновесный или неравновесный), то при том же подводе тепла  $Q$  и том же общем характере процесса (например, при том же изменении объема рабочего тела) будет получена работа  $W_n < W_o$ . Часть работы „теряется“, т. е. переходит в теплоту. Работа неравновесного процесса будет

$$W_n = W_o - W_n, \quad (4)$$

(где  $W_n$  — работа, перешедшая в теплоту вследствие необратимости процесса например, трение и т. п.). Из (2) и (4) имеем:

$$Q = U_{2o} - U_1 + AW_n + AW_n. \quad (5)$$

Работа, перешедшая в тепло вследствие необратимости процесса, вызывает соответственное повышение внутренней энергии рабочего тела. Величина внутренней энергии в конце необратимого процесса будет:

$$U_{2n} = U_{2o} + AW_n. \quad (6)$$

Поэтому

$$Q = U_{2n} - U_1 + AW_n. \quad (7)$$

Для элементарного необратимого равновесного процесса:

$$dQ = dU_n + AdW_n. \quad (8)$$

Математическое выражение первого закона для движущегося рабочего тела при обратимом изменении его состояния имеет вид:

$$q = i_{2o} - i_1 + A \frac{c_{2o}^2 - c_1^2}{2g} + Al_T, \quad (9)$$

где  $i_{20}$  — энтальпия рабочего тела в конце процесса,  
 $c_{20}$  — конечная скорость рабочего тела.

При необратимом процессе изменения состояния рабочего тела это соотношение надо писать так:

$$q = i_{20} - i_1 + A \frac{c_{20}^2 - c_1^2}{2g} + Al_\tau, \quad (10)$$

где  $i_{20}$  и  $c_{20}$  — энтальпия и скорость рабочего тела в конце действительного процесса соответственно.

В ряде книг ([1], [2], [3] и [4]) приводится не совсем правильное или, во всяком случае, нечеткое начертание первого закона для неравновесных (или необратимых равновесных) процессов. Так, М. П. Вукалович и И. И. Новиков, написав на странице 81 [1] уравнение (10) в общем виде

$$E_1 + p_1 V_1 = E_2 + p_2 V_2 + L' - Q \quad (2-67)$$

и, в частности, для 1 кг:

$$i_1 + \frac{W^2}{2g} = i_2 + \frac{W_2^2}{2g} + l' - q, \quad (2-68)$$

далее добавляют: „Теплота трения  $Q_{тр}$  в величину  $Q$  не входит. Действительно, при наличии трения на преодоление сил трения должна затрачиваться работа  $L_{тр}$ ; так как работа против сил трения полностью переходит в теплоту, то внутри данного количества текущего газа выделится количество тепла  $Q_{тр}$ , эквивалентное  $L_{тр}$ . Чтобы учесть влияние трения на течение газа (или жидкости), в правую часть уравнения (2-68) нужно подставить значения  $L_{тр}$  и  $Q_{тр}$ , являющиеся составными частями внешней работы  $L$  и общего количества тепла  $Q$ . Вследствие эквивалентности работы трения  $L_{тр}$  и теплоты трения  $Q_{тр}$  обе эти величины взаимно сокращаются и, таким образом, выпадают из уравнения (2-67)“.

Эти рассуждения и, в особенности, последнее заключение нельзя признать правильными. Теплота, эквивалентная работе против сил трения, дает соответственное увеличение внутренней энергии (а, следовательно, и энтальпии) рабочего тела, т. е. не выпадает из уравнения, выражающего первый закон термодинамики.

В книге В. С. Жуковского [2] этот вопрос толкуется аналогично. Сначала рассматривается явление без учета трения. Записывается уравнение сохранения энергии для потока

$$dg = di + Ad \frac{W^2}{2g} + Adl_\tau \quad (VII, 2)$$

и обобщенное уравнение Бернулли:

$$v dp + d \frac{W^2}{2g} + dl_\tau = 0. \quad (VII, 3)$$

Почленное вычитание их дает:

$$dq = du + A p dv = di - A v dp. \quad (VII, 4)$$

Далее, на стр. 353 читаем: „Поскольку внутренняя работа трения была переведена в категорию внешних воздействий на рабочее тело, в уравнении сохранения энергии надлежит к количеству извне подведенной теплоты  $dq$

присоединить еще теплоту трения  $dq_{TP}$ , как если бы последняя передавалась элементу через его поверхность. На основании сказанного

$$dq + dq_{TP} = di + Ad \frac{W^2}{2g} + Adl_T + Adl_{TP}.$$

... Величины  $dq_{TP}$  и  $Adl_{TP}$ , входящие в последнюю формулу, взаимно равны и подлежат сокращению. В результате мы приходим к уравнению сохранения энергии (VII, 2), которое было ранее установлено применительно к невязкому потоку“.

Далее пишется уравнение Бернулли:

$$vdp + d \frac{W^2}{2g} + dl_T + dl_{TP} = 0 \quad (\text{VII, 3a})$$

и, вычитая его из (VII, 2), получаем:

$$dq = di - Aidp - Adl_{TP} = du + Apdv - Adl_{TP}. \quad (\text{VII, 4a})$$

„Независимость формулы (VII, 2) от того, проявляется или не проявляется трение в потоке, объясняется следующим.

Формула (VII, 2) дает суммарный эффект энергетического взаимодействия, выделенного из потока элемента с окружающей средой. Очевидно, что приращение энергии системы при заданном количестве полученной извне теплоты и заданной величине внешней работы определяется вполне однозначным образом. При этом совершенно несущественно, какие именно внутренние процессы происходили в элементе на пути между его начальным и конечными положениями. Отсюда и следует, что изменение энергии элемента

$$\Delta i + A \Delta \frac{W^2}{2g}$$

ни в какой мере не зависит от того, проявляется или не проявляется трение при течении жидкости или газа в трубе. Однако самым непосредственным образом трение влияет на распределение приращения энергии между отдельными ее составляющими—энтальпией и кинетической энергией“.

Автор, конечно, прав, утверждая, что при данном подводе тепла сумма

$$\Delta i + A \Delta \frac{W^2}{2g} (+ Al_T)$$

остается постоянной величиной, независимо от того, имеет ли место трение или его нет. Это непосредственно вытекает из закона сохранения и превращения энергии. Но практический смысл написания математического выражения первого закона состоит в том, чтобы в явном виде выделить связь между подведенным извне теплом и количеством полученной полезной работы. В необратимых процессах с трением, для которых написано уравнение (VII, 3a), изменение параметров состояния  $v$  и  $p$  и скорости  $w$  будет иным, чем при обратимых процессах, для которых написано уравнение (VII, 2). Поэтому вычитание (VII, 3a) из (VII, 2) является незаконной операцией.

Формулы (VII, 2), (VII, 3) и (VII, 4), относящиеся к обратимым процессам, следует записывать так:

$$dq = di_o + Ad \frac{w_o^2}{2g} + Adl_T \quad (\text{VII, 2})'$$

$$v_o dp_o + d \frac{w_o^2}{2g} + A dl_T = 0 \quad (\text{VII, 3})'$$

$$dq = du_o + Ap_o dv_o = di_o - A v_o dp_o, \quad (\text{VII}, 4),$$

где индексом „о“ подчеркнуто, что все величины в этих уравнениях относятся к обратимому процессу.

Для равновесного необратимого процесса основное соотношение первого закона термодинамики имеет вид:

$$dq = di_n + Ad \frac{w_n^2}{2g} + Adl_T. \quad (\text{a})$$

Уравнение Бернулли следует записать так:

$$v_n dp_n + d \frac{w_n^2}{2g} + dl_T + dl_{TP} = 0. \quad (\text{VII}, 3a)'$$

Вычитая (VII, 3a) из (a), получим:

$$dq = di_n - A v_n dp_n - Adl_{TP} - du_n + A p_n dv_n - Adl_{TP}. \quad (\text{VII}, 4a)'$$

Индексом „н“ в этих соотношениях подчеркивается, что в необратимом процессе изменение параметров состояния рабочего тела идет по другому закону, чем при обратимых процессах. Иначе будет меняться внутренняя энергия рабочего тела, другой будет и работа проталкивания.

Н. И. Белокоп [4], рассматривая равновесные необратимые процессы, вводит понятие термодинамического (приведенного) теплообмена в виде суммы

$$\delta Q = \delta Q^* + \delta Q^{**},$$

где  $\delta Q^*$  и  $\delta Q^{**}$  — тепло, подведенное извне, и тепло внутреннего теплообмена (от трения), соответственно и понятие термодинамической работы

$$\delta L = \delta L^* + \delta L^{**},$$

где  $\delta L^*$  и  $\delta L^{**}$  — эффективная внешняя работа и необратимая потеря работы соответственно.

Основное уравнение записывается им в виде (стр. 64):

$$\delta Q = du + A \delta L. \quad (\text{ж})$$

Если учесть, что теплота трения эквивалентна работе, затраченной на преодоление сил трения

$$\delta Q^{**} = A \delta L^{**},$$

то приведенное соотношение переходит в

$$\delta Q^* = du + A \delta L^*,$$

т. е. получается тем же, что для обратимого процесса. В действительности же при одном и том же подводе теплоты извне необратимый процесс даст меньшее количество внешней работы, чем обратимый.

Целесообразность введения понятий термодинамического теплообмена и термодинамической работы вызывает серьезные сомнения. Практическое значение имеют величины внешнего тепла и внешней работы. Введение новых понятий усложняет и без нужды запутывает принятую терминологию. Так, например, адиабатный процесс в понимании Н. И. Белокопья получается в том случае, когда термодинамический теплообмен  $\delta Q = 0$ . В обычном же понимании этого термина (сравни [5], термин 84) адиабатный процесс происходит при отсутствии подвода внешнего тепла. Процесс дросселирования по Н. И. Белокопю будет не адиабатным, а „внешнеадиабатическим“ процессом. Но если сопровождать процесс дросселирования отводом тепло-

ты, то он может стать адиабатным. Непонятно, какую пользу может принести такое изменение общепринятой терминологии.

Потеря работы в неравновесном (необратимом) процессе по сравнению с обратимым равна работе, затраченной на преодоление сил трения. На эту же величину увеличивается в необратимых процессах конечное значение внутренней энергии рабочего тела. Если сравниваются между собой необратимый и обратимый процессы при одинаковом подводе тепла и одинаковом изменении объема рабочего тела, то это очевидно из соотношений (4), (6) и (7).

В движущемся рабочем теле теплота, эквивалентная работе, пошедшей на преодоление сил трения, также вызывает соответственное увеличение внутренней энергии рабочего тела и уменьшение внешней работы. При этом в необратимом процессе параметры состояния рабочего тела меняются по иному закону, чем в обратимом процессе. Это вызывает изменение величины работы проталкивания газа. Нас же обычно интересует потеря работы в виде кинетической энергии и внешней работы ( $l_T$ ).

Сравним результаты обратимого и необратимого процессов в движущемся рабочем теле при одном и том же подводе тепла, одинаковых начальных состояниях и одинаковых конечных давлениях. Сопоставляя при этих условиях (а) и (VII, 2)', получаем:

$$\frac{w_{20}^2}{2g} - \frac{w_{2H}^2}{2g} = i_{2H} - i_{20}.$$

Но

$$i_{2H} = u_{2H} + A p_2 v_{2H}$$

$$i_{20} = u_{20} + A p_2 v_{20}.$$

Далее

$$u_{2H} = u_{20} + A l_{TP}. \quad (6')$$

Поэтому:

$$\frac{w_{20}^2}{2g} - \frac{w_{2H}^2}{2g} = A l_{TP} + A p_2 (v_{2H} - v_{20}). \quad (11)$$

Таким образом, потеря кинетической энергии в необратимых процессах при указанных условиях больше, чем затрата работы на преодоление сил трения на ту величину, на которую увеличивается работа проталкивания газа в необратимом процессе.

А. Литвин [3], рассматривая явление истечения газа с сопротивлениями, приходит к выводу (стр. 233), что кинетическую энергию действительного истечения можно получить как кинетическую энергию при идеальном истечении минус тепловой эквивалент работы трения, плюс энергия истечения, появившаяся в результате подвода к рабочему телу тепла трения. Таким образом, получается, что потеря кинетической энергии при истечении с сопротивлениями меньше, чем работа сил трения. Этот неправильный результат получился потому, что без всякого основания было принято, что теплота трения выражается площадью под условной кривой действительного процесса расширения газа в  $\bar{S}-T$  диаграмме. Одновременно указывается, что вид этой кривой расширения роли не играет, так как соответственная площадь выпадает при окончательном суммировании. Между тем очевидно, что при данном подводе тепла, начальном и конечном состояниях рабочего тела затрата работы на преодоление сил трения является определенной величиной.

## Выводы

1. При необратимых процессах потеря от необратимости вызывает соответственное увеличение внутренней энергии рабочего тела. Работа при расширении в том же интервале объемов, как в обратимом процессе, уменьшается на ту же величину.

2. В движущемся рабочем теле наличие сопротивлений ведет к увеличению работы проталкивания газа. Поэтому потеря кинетической энергии больше работы, затраченной на преодоление сил трения.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В у ж а л о в и ч М. П., Н о в и к о в И. И. — Техническая термодинамика. Госэнергоиздат, 1952.
  2. Ж у к о в с к и й В. С. — Техническая термодинамика. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952.
  3. Л и т в и н А. М. — Техническая термодинамика. Госэнергоиздат, 1947.
  4. Б е л о к о н ь Н. И. — Термодинамика. Госэнергоиздат, 1954.
  5. Комитет технической терминологии АН СССР. Терминология термодинамики. Академия наук СССР, 1952.
-